



## ExPro: Exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior

### [ExPro: Exoskeleton for upper limb rehabilitation]

Aída Daniela Becerra López<sup>1</sup> ; Juan Pablo Flórez Suárez<sup>1</sup>; David Orlando Palencia Vergara<sup>1</sup>; Juliana Orjuela García<sup>1</sup>; Elizabeth Andrea López Pérez<sup>1</sup> ; Luis Miguel Méndez Moreno <sup>2</sup>

<sup>1</sup>.- Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional sede Bogotá.

<sup>2</sup>.- Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional sede Bogotá. [immendezm@unal.edu.co](mailto:immendezm@unal.edu.co)

#### Resumen

El Expro es un exoesqueleto de 3 grados de libertad, diseñado por un equipo interdisciplinar de estudiantes de ingeniería y medicina, creado con el objetivo de brindar asistencia en tratamientos de rehabilitación en los brazos. El Expro es controlado mediante una interfaz gráfica que envía información a un dispositivo de control y posteriormente a los servomotores; en esta interfaz se escoge el tipo de movimiento, el ángulo del movimiento, el número de series y la cantidad de repeticiones por serie, posteriormente se almacena esta información en la base de datos (toda la interfaz y la base de datos fueron programadas en Python). Los componentes mecánicos fueron diseñados en Inventor e impresos en 3D. La división de control consiste en una Raspberry Pi que recibe la información y la interpreta y la transmite a una pcb de control que manipula los servomotores de cada grado de libertad.

**Palabras clave:** Exoesqueleto, impresión 3D, rehabilitación, terapia.

#### Abstract

The ExPro is an exoskeleton with 3 degrees of freedom designed by a multidisciplinary team of medicine and engineering undergraduate students, created for providing assistance in rehabilitation treatments of arms. The Expro is controlled through a graphical interface that sends information to a control device and then to the servomotor; in this interface, the type and angles of movement and the configuration of sets and repetitions per routine are chosen, later this information is stored in the database (The entire interface and database were programmed in Python language). The mechanical components were designed in Autodesk Inventor software and 3D printed. The controlling section consist of a Raspberry Pi 3 that receives information, interprets and connects it to the control PCB, which turn manipulates the servomotors of each degree of freedom.

**Keywords:** exoskeleton, rehabilitaci3n, 3D printing, therapy

## **1.-Introducción**

De acuerdo con la Convención de la ONU, 2006 la discapacidad se define como el resultado de la interacción entre las personas con deficiencias y las barreras debidas a la actitud o entorno donde es impedida su participación plena en igualdad de condiciones, entiéndase entonces por discapacidad deficiencias tanto físicas como mentales. De acuerdo a estudios estadísticos de la OMS a nivel mundial la cantidad de personas con alguna forma de discapacidad supera los mil millones de personas, un 15% de la población mundial, de los cuales 200 presentan dificultades considerables en su funcionamiento. Esta investigación enfatiza en las discapacidades físicas, particularmente en la regeneración de movilidad en miembro superior.

El interés en la investigación nace con el Síndrome Guillain Barré, en Colombia, según la OMS, se registran por lo menos 242 casos anuales.

Este síndrome provoca que el recubrimiento nervioso se deshaga y esto causa que haya pérdida total o parcial de movilidad del miembro afectado, el lado positivo es que esto es reversible mediante intensa fisioterapia hasta que el tejido nervioso se recupere y regrese a su estado inicial. El acceso a fisioterapia intensiva como la que requiere esta y muchas otras condiciones es difícil de lograr dado a que es un área de la medicina donde se requiere un especialista y mucho tiempo para múltiples terapias de rehabilitación.

Atendiendo a estas falencias, se consolida la creación del ExPro, un exoesqueleto con tres grados de libertad orientado a la rehabilitación de miembro superior con manipulación asistida por el profesional pertinente, específicamente fisioterapeuta o terapeuta ocupacional, con el objetivo de

hacer más efectiva la terapia, más sistemática y amigable tanto para usuario como para operador, ofreciendo interacción virtual mediante la interfaz gráfica diseñada y tres grados de seguridad a nivel mecánica, electrónico y digital.

## **Motivación**

Un terapeuta en una jornada regular atiende un promedio de veinte pacientes, lo que suele implicar cansancio y desgaste tanto físico como mental, situación agravada con la diversidad de tratamientos a realizar y la complejidad de los mismos.

El ExPro es un proyecto que surge como una idea concebida por estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia, los cuales en un intento por mejorar generar un aporte colaborativo a la situación de salud previamente descrita deciden acudir a la asesoría de una terapeuta ocupacional del Hospital Universitario Nacional de Colombia, la cual guió la formulación de la problemática desarrollada durante el proyecto, resumida en una pregunta “¿cómo ayudar a los terapeutas a la hora de realizar una terapia con pacientes que padecen de inmovilidad total o parcial?”, orientado de manera enfática en el caso del Guillain-Barré que fue el eje patológico que sentó las bases de arranque del proyecto.

El síndrome de Guillain-Barré es un trastorno autoinmunitario donde el cuerpo del afectado se ataca a sí mismo, más explícitamente, el sistema inmunitario del cuerpo detecta como antígenos al recubrimiento del sistema nervioso, por lo cual decide atacar, generando hinchazón y pérdida de movilidad parcial o total.

Como resultado de esta problemática y de la investigación realizada se llegó a la conclusión de construir un exoesqueleto que permite ser manipulado por un terapeuta mediante una interfaz gráfica, lo suficientemente fuerte para realizar una

5

terapia sin problemas, pero también que permita su fácil movilidad a lo largo de un hospital, orientado a la rehabilitación y tratamiento de la enfermedad mencionada.

## **1. Metodología**

Como se mencionó ya en la motivación, la problemática tratada en el proyecto está enfocada en el mejoramiento de condiciones laborales a las que se somete un terapeuta ocupacional o fisioterapeuta en un jornada de trabajo regular en el área de rehabilitación, más concretamente para el proyecto en cuestión, rehabilitación pasiva del miembro superior. Teniendo claridad de este aspecto, la estructuración del proyecto procede a establecer un estado del arte mediante una revisión bibliográfica de dispositivos existentes con el mismo propósito desarrollados con anterioridad en periodos de tiempo recientes.

Entre los dispositivos encontrados de destacan:

- Soft-Actuated, exoesqueleto de siete grados de libertad, implementados con músculos neumáticos (Sheng, Zhang, Meng, Deng & Xie, 2016).
- BLEEX (Berkeley Lower Extremity Exoskeleton o Exoesqueleto para extremidades inferiores de Berkeley), que hace uso de una arquitectura de control en red (ExoNET) para controlar e interactuar con la red física sobre la que corren los algoritmos de control (Pons, 2008).
- ASSIST (Active Support Splint o Férula de Soporte Activo) exoesqueleto de un grado de libertad que funciona con actuadores neumáticos suaves (Kwakkel, Kollen & Krebs, 2007).

Estos son tan solo algunos de los muchos dispositivos con funcionalidades y propósitos similares o relacionados, que en la etapa de

formulación constituyeron una etapa importante en el planteamiento de la etapa de diseño, descrita más adelante. Ahora bien, partiendo de la asesoría profesional recibida de la terapeuta ocupacional Silvia Duarte, funcionaria del hospital universitario Nacional, y del MSc. ingeniero mecánico Luis Miguel Méndez, ambos docentes vinculados con la Universidad Nacional de Colombia, en conjunto con la investigación realizada se establecieron los objetivos específicos y requerimientos preliminares del proyecto, enunciados a continuación:

- Seguridad, teniendo presente el escenario y aplicación al que va dirigido, el dispositivo debe contar con altos niveles de seguridad, que garanticen precaución suficiente para cumplir con el objetivo de las terapias sin causar ningún tipo de lesión en el paciente.
- Portabilidad, su movilización debe ser sencilla, de manera tal que pueda ser rápida y fácilmente transportado de un lugar a otro, teniendo en cuenta que será utilizado dentro de un hospital y que el paciente podría o no desplazarse.
- Fácil manejo, hacer uso del dispositivo debe ser una tarea sin mayor dificultad, es decir, debe permitir al terapeuta total control de las rutinas desde una interfaz básica.

Con esto en mente, el trabajo de Protos UN se dividió en tres grandes áreas funcionales (mecánica, electrónica y HMI) cada una con un listado de requisitos a nivel ingenieril necesarios para el funcionamiento del dispositivo.

El área mecánica estuvo a cargo del diseño estructural, los cálculos de fuerzas y velocidades relacionadas, la selección de materiales y el ensamblaje del dispositivo. Algunos de los principales métodos aplicados por este grupo incluyen la manufactura aditiva (impresión 3D),

6

utilizada para la construcción de algunas de las partes del dispositivo tales como engranajes, soportes, bases para motores y demás piezas de unión entre segmentos, así como algunos procesos de manufactura de corte láser, taladrado y fresado, necesarios para el maquinado de algunas piezas.

Por su parte, el área electrónica se ocupó del control del dispositivo mediante la selección de actuadores, elementos de potencia y alimentación y el diseño de PCBs y finalmente, el grupo de HMI (Human Machine Interface) seleccionó el software de desarrollo, diseñó la interfaz gráfica, programó las rutinas de control y realizó la comunicación entre la interfaz y los circuitos de control.

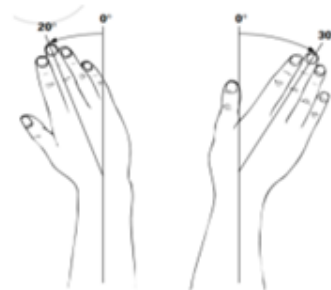
## 2. Resultados

El prototipo actual del ExPro se desarrolló en 1 año, para la fecha representa un sistema capaz de rehabilitar tres grados de libertad del miembro superior, capaz de simular los movimientos de pronación y supinación del codo, flexo-extensión de la muñeca y desviación ulnar-radial de la muñeca. Mediante tres servomotores se ejecutan movimientos necesarios para el proceso de rehabilitación muscular. El dispositivo permite seleccionar y definir la terapia (seleccionando los límites angulares de cada uno de los seis movimientos) mediante una aplicación por computador que envía la información al dispositivo de control principal: una Raspberry Pi3. La Raspberry traduce dicha información en comandos para accionar los servomotores y así generar los movimientos determinados. El dispositivo funciona desde tres grandes partes. A nivel electrónico, se desarrolló una PCB, encargada de alimentar la raspberry Pi y los distintos componentes electrónicos además de encargarse del control que consiste en comunicar la HMI con los actuadores

siguiendo las órdenes de los usuarios. A nivel mecánico, el primer paso realizado fue la definición de las velocidades y torques para cada uno de los motores. Por tanto, el dispositivo está programado para trabajar a una velocidad constante, determinada previamente mediante la realización de pruebas. Por otra parte, el dispositivo está diseñado para soportar el peso y ser capaz de mover el brazo de una persona de 100 kg. Como se dijo anteriormente, el exoesqueleto consta de tres grados de libertad, partiendo de esto, realiza movimiento terapéutico como más adelante se describe.

### 4.1 Grados de libertad.

#### 2.1.1. Grado de libertad 1: Desviación ulnar-radial de Muñeca



*Figura 1: Desviación Ulnar-Radial*



*Figura 2: Rotación de servomotor 1*

Este movimiento se genera desde el primer servo-motor como se observa en la Figura 2.

7

## 2.1.2. Grado de libertad 2: Flexo-Extensión Muñeca



Figura 3: Flexo-extensión

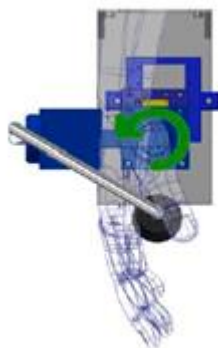


Figura 4: Rotación servomotor 2

A partir de un servomotor 2 (Figura 4) se genera un movimiento rotacional que debe comprender un rango de  $120^\circ$ . Por medio de la pieza soporte el movimiento se transmite al mando y este a su vez a la mano, con lo que se obtiene un movimiento de flexo-extensión.

## 2.1.3. Grado de libertad 3: Prono-supinación antebrazo

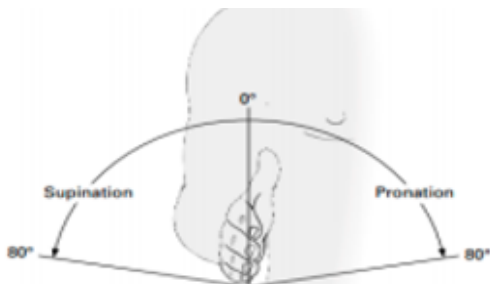


Figura 5: Prono-supinación

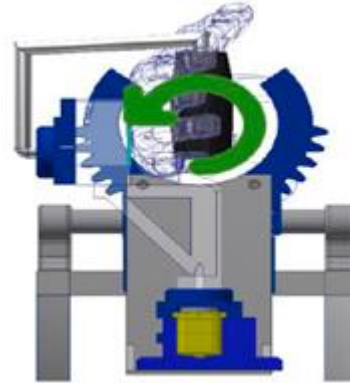


Figura 6: Rotación Servomotor 3

A partir de un servomotor 3 se genera un movimiento rotacional que debe comprender un rango de  $160^\circ$  (Figura 5). El piñón montado en el servomotor transmite la potencia al engrane, sobre este engrane se encuentra montada toda la estructura que lleva hasta la muñeca. Por tal razón, al mover el engrane, toda la estructura de la muñeca se mueve produciendo el movimiento de prono-supinación.

## 2.2. Cálculos:

### 2.2.1. Engranaje (Corona + Piñón) metodología AGMA

En primera instancia se definió la relación de transmisión de 2, y el módulo a implementar  $m=4$ , estos valores se decidieron debido a que la fabricación se realizaría por fabricación aditiva (Impresión 3D), y un ángulo de presión  $20^\circ$ . Teniendo esto definido, y los torque y velocidades de trabajo, se definió la geometría del piñón y la corona.

Tabla 1: Geometría piñón-corona



#### 4.2.2. Esfuerzo a flexión AGMA

Los cálculos relacionados con los esfuerzos a flexión en el engrane se realizaron siguiendo la metodología AGMA. De acuerdo con las tablas preestablecidas para Nylon, se calculó tanto el esfuerzo soportable por el engrane como el esfuerzo permisible, agregando un factor de corrección de material impreso en caso de que se trabajara otro material con diferentes propiedades mecánicas. Por último, se determinaron los factores de seguridad necesarios para la flexión.

Tabla 2: Esfuerzos a flexión de engranajes rectos

Resistencia a la flexión material [Mpa]	48
Esf. Adm. Flexionante (kgf/mm <sup>2</sup> )	1,5
Esf. Adm. Flexionante (MPa)	14,7105
Factor de corrección por material e impresión	0,8
Esf. Adm. Flexionante Material (MPa)	11,7684
N de ciclos piñón	100000
Esfuerzo Admisible Corregido (Mpa)	25

Tabla 3: Esfuerzo a picadura de engranaje recto

Factor_Seguridad_Flexión	6,29 (piñón)	6,98 (engrane)
Esfuerzo Admisible Contacto (MPa)	24,5175	
No de ciclos Piñón	100000	
Esfuerzo Admisible Corregido (Mpa)	30,481	
Factor_Seguridad_Picadura	1,5	

#### 2.2.2. Corona

Los esfuerzo y deformaciones sobre las piezas más críticas del dispositivo fueron analizados con ayuda de la herramienta de análisis por elementos finitos del software Inventor®. Los primeros en evaluar fueron el engrane principal y el piñón de la sección pronosupinación. Para el caso del engrane, se observó que los mayores esfuerzos se presentan en la raíz de diente, no obstante, el esfuerzo máximo no superó el esfuerzo admisible del material (28 MPa para PLA impreso).

ENGRANAJE RECTO.	Piñón	Engrane
N [Numero de dientes]	18	36
X [Relación de velocidad]	1	2
Angulo de presión normal (°)	20	20
Pn Paso diametral (dientes /mm)	0,25	0,25
d Diámetro de paso (mm)	72	144
Espesor del diente "t" [mm]	6,3	6,3
F ancho de cara	17,59	

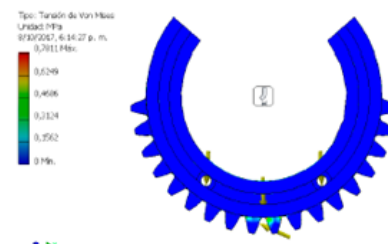


Figura 7: Distribución de esfuerzos - Engrane principal

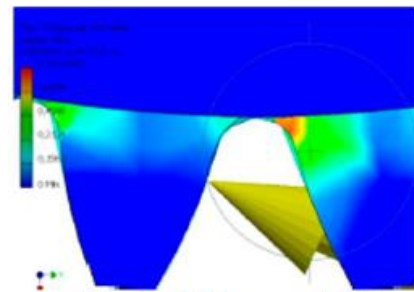


Figura 8: Esfuerzos en el diente

#### Desplazamientos y deformaciones de engrane

Adicionalmente, el análisis de desplazamientos evidenció que la punta del diente del engrane fue la más afectada, sin embargo, el desplazamiento máximo de la pieza mediante simulación arrojó un valor de 0,1069 mm que permite considerar como despreciable la deformación del diente.

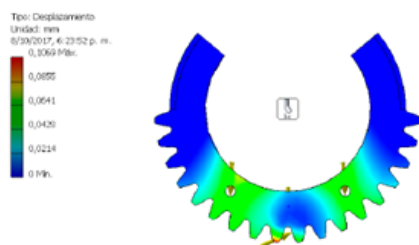


Figura 9: Desplazamientos y deformaciones

### 2.2.3. Piñón

Por su parte, el piñón de la sección pronosupinación presentó mayores esfuerzos cerca al agujero del eje, esto debido a los demás agujeros que permiten el acople el motor y que actúan como concentradores de esfuerzos (Figura 10). No obstante, cuando se compara el esfuerzo máximo arrojado por la simulación (1,6 MPa) con el esfuerzo admisible del material (28 MPa) es evidente que se encuentra muy por debajo y por ende es despreciable. De manera similar, cuando se analizan los desplazamientos, el diente del piñón presenta la mayor deformación con valores de 0,6898 mm (Figura 11).

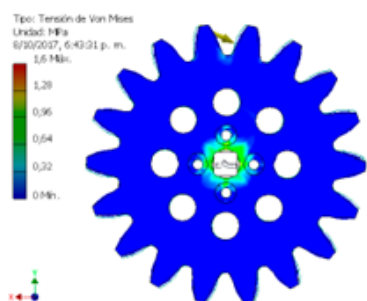


Figura 10: Esfuerzos en el piñón

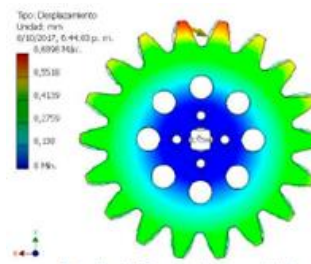


Figura 11: Desplazamientos en el piñón

### 2.2.4. Cálculos asociados a la muñeca

Aquellas piezas con mayor sección en voladizo también fueron sometidas a un análisis por elementos finitos de modo que se simularán cargas en puntos críticos y se obtuvieron tanto los esfuerzos como los desplazamientos máximos.

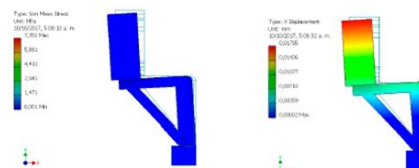


Figura 12: Soporte en voladizo.

Tal como se evidencia en la Figura 12, el esfuerzo máximo obtenido fue de 7.352 MPa, un valor bastante inferior al esfuerzo admisible del material y el desplazamiento máximo fue de 0,018 mm aproximadamente, que en comparación con las medidas del mecanismo es igualmente despreciable.

### 2.2.5. Soporte Mando

Por otra parte, la pieza denominada Soporte Mando arrojó un esfuerzo máximo de 0.727 MPa y un desplazamiento máximo de 1 mm aproximadamente, ambos valores permitidos dentro de los requerimientos funcionales.

10

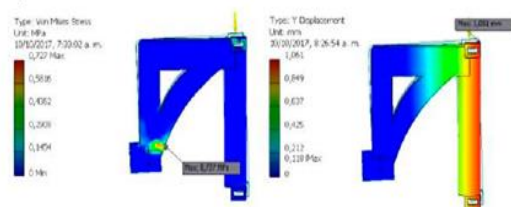


Figura 13: Soporte mando

## 2.2.6. Soporte de Rodamiento

La pieza a continuación es utilizada en dos posiciones diferentes durante el funcionamiento del dispositivo, por tanto, fue necesario su análisis en ambos sentidos con sus respectivas restricciones:

Disposición 1:

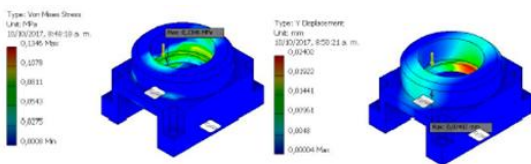


Figura 14: Soporte rodamiento - Disposición 1

El esfuerzo máximo obtenido fue de 0.135 MPa, nuevamente por debajo del esfuerzo permisible del material, y un desplazamiento máximo de 0,024 mm aproximadamente que no genera alteraciones.

Disposición 2:

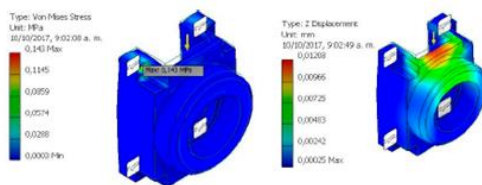


Figura 15: Soporte rodamiento - Disposición 2

En esta posición el esfuerzo máximo arrojado fue de 0.143 MPa y el desplazamiento máximo fue de 0.012 mm aproximadamente, como ya se intuye, esos

valores una vez más no interfieren con el diseño de las piezas.

La Figura 16 muestra la primera versión del dispositivo terminado.

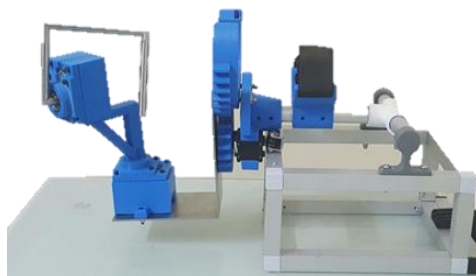


Figura 16: ExPro a nivel mecánico.

## 3. Discusión

Gracias a los avances ya evidenciados se estima en un futuro cercano seguir haciendo modificaciones y adecuaciones al prototipo con el objetivo final de generar un aporte fuera de la teoría e idealización tanto a desarrollo de la tecnología en Colombia como a las problemáticas abordadas, salud tanto de terapeutas como en la de los pacientes tratados. Dentro de las mejoras proyectadas se estima la implementación de un cuarto grado de libertad, cambios en la praxis para generar un nuevo prototipo con mejor relación de fuerza y peso. Además de esto se espera poder implementar ayudas de software, partiendo por el mejoramiento de la interfaz gráfica ya diseñada, haciéndola más amigable con el usuario, en conjunto a ella se espera adecuar una base de datos que permita almacenar información de los pacientes en cuestión para hacer análisis de su progreso a lo largo de los tratamientos establecidos. Así mismo se espera adecuar el prototipo a especificaciones de equipos médicos en pro de una pronta implementación en escenarios reales

## Conclusiones



11

Basados en las experiencias recopiladas por los fisioterapeutas del hospital universitario nacional de Colombia, se determina que la rehabilitación asistida por el ExPro será significativa para aumentar la eficiencia y así optimizar el proceso terapéutico, puesto que su diseño está pensado con el objetivo de ser una herramienta de apoyo, al reducir el esfuerzo físico empleado. Además el uso del software les permitirá controlar la terapia de forma simplificada y de esta forma llevar una mejor inspección de los progresos de los pacientes de esta forma se pueden atender mayor cantidad de personas y de esta forma más gente reciba el servicio a un menor costo.

### **Agradecimientos**

El proyecto en cuestión ha sido desarrollado por un grupo de cerca de 20 estudiantes de pregrado de la universidad nacional de Colombia, pertenecientes al semillero de investigación Protos UN, avalados por el ingeniero Luis Miguel Mendez Moreno y apoyados por la dirección de bienestar universitario desde el Programa de Gestión de Proyectos, todos ellos involucrados en el proyecto desde su inicio en el segundo semestre académico del año 2017, lo que los hace merecedores de reconocimiento es esta sección pues sin su trabajo y compromiso no sería posible contar con un desarrollo tangible de este proyecto. De manera especial se hace mención de Javier Fernando Garnica Molina, Jessica Zuleima Parrado Agudelo, Juan Nicolas Bustos Ramirez y Cristián Mauricio Casallas Contreras por ser los fundadores y principales desarrolladores de esta idea finalmente materializada, también hacer una mención especial a la terapeuta Silvia Duarte por su cooperación al momento de concebir

la idea inicial del proyecto y sus constantes recomendaciones al respecto.

### **Referencias Bibliográficas**

Pons, J. (2008). Wearable robots: Biomechatronic Exoskeletons. Madrid: John Wiley & Sons.

World Health Organization. (2011). WORLD REPORT ON DISABILITY (pp. [http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/70670/WHO\\_NMH\\_VIP\\_11.01\\_eng.pdf;jsessionid=E20F97F9C7E8DDEA1C51740E255A21F3?sequence=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/70670/WHO_NMH_VIP_11.01_eng.pdf;jsessionid=E20F97F9C7E8DDEA1C51740E255A21F3?sequence=1)). Malta: World Health Organization.

Celis Parra, D., Montañez, G., & Jaimes, M. (2013). Factores personales que influyen en el comportamiento ocupacional de los estudiantes de terapia ocupacional de la Universidad de Pamplona. Bistua:Revista De La Facultad De Ciencias Básicas, 11(1), 57 - 66. doi: <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2013.841>

Duran Acevedo, C., & Jauregui Duarte, J. (2014). Desarrollo de un sistema embebido para la clasificación de señales EMG. Bistua:Revista De La Facultad De Ciencias Básicas., 12(2), 58-69. doi: <https://doi.org/10.24054/01204211.v2.n2.2014.1659>

Sheng, B., Zhang, Y., Meng, W., Deng, C., & Xie, S. (2016). Bilateral robots for upper-limb stroke rehabilitation: State of the art and future prospects. Medical Engineering & Physics, 38(7), 587-606. doi: 10.1016/j.medengphy.2016.04.004

12

Kwakkel, G., Kollen, B., & Krebs, H. (2007). Effects of Robot-Assisted Therapy on Upper Limb Recovery After Stroke: A Systematic Review. *Neurorehabilitation And Neural Repair*, 22(2), 111-121. doi: 10.1177/1545968307305457

Bütefisch, C., Hummelsheim, H., Denzler, P., & Mauritz, K. (1995). Repetitive training of isolated movements improves the outcome of motor rehabilitation of the centrally paretic hand. *Journal Of The Neurological Sciences*, 130(1), 59-68. doi: 10.1016/0022-510x(95)00003-k

Tibaduiza Burgos, D., Chio, N., Grosso, J., & Anaya, M. (2009). Diseño de un exoesqueleto mecatrónico de brazo basado en screws y robots paralelo. In 2do Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica. Bucaramanga, Colombia. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/258265933\\_Diseño\\_de\\_un\\_exoesqueleto\\_mecatronico\\_de\\_brazo\\_basado\\_en\\_screws\\_y\\_robots\\_paralelos](https://www.researchgate.net/publication/258265933_Diseño_de_un_exoesqueleto_mecatronico_de_brazo_basado_en_screws_y_robots_paralelos)

Gutierrez, R., Niño Suárez, P., Aviles Sánchez, O., Vanegas, F., & Duque, J. (2007). Exoesqueleto mecatrónico para rehabilitación motora. in 8º congreso iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cusco, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. Retrieved from <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/19/19-22.pdf>

\*Para citar este artículo: Becerra López A.D ; Flórez Suárez J.P; Palencia Vergara D.O; Orjuela García J; López Pérez E.A ; Méndez Moreno L.M. *ExPro: Exoskeleton for upper limb rehabilitation*.Revista Bistua. 2019.17(3):03-12.

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: Méndez Moreno L.M. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional sede Bogotá. [Immendezm@unal.edu.co](mailto:Immendezm@unal.edu.co)

Recibido: Octubre 16 de 2018

Aceptado: Enero 20 de 2019